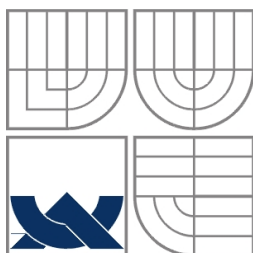




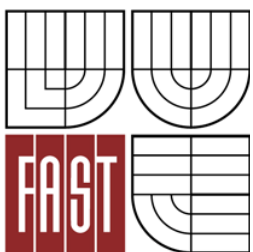
VUT Brno FAST

Posouzení přesnosti elektromagnetické
lokalizace podzemních prostor



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF GEODESY

POSOUZENÍ PŘESNOSTI ELEKTROMAGNETICKÉ LOKALIZACE PODZEMNÍCH PROSTOR

ACCURACY ASSESMENT OF UNDERGROUND SPACES ELECTROMAGNETIC
LOCALIZATION METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. RADIM SKULINA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

Ing. RADIM KRATOCHVÍL, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2013



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

SKULINA, Radim. *Posouzení přesnosti elektromagnetické lokalizace podzemních prostor*. Brno, 2013. 49 s., 7 příloh, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D..

ANOTACE V ČESKÉM JAZYCE

Cílem této diplomové práce je posouzení přesnosti elektromagnetické lokalizace podzemních prostor a porovnání s výsledky dosaženými Ing. Martinem Šklíbou v roce 2006. Pro posouzení přesnosti bylo využito již existující Účelové bodové pole Býčí skála a předchozí měření v podzemních prostorech jeskyně Býčí skála za posledních 15 let.

ANOTACE V ANGLICKÉM JAZYCE

The aim of this diploma work is accuracy assesment of underground spaces electromagnetic localization method and comparison with results made by Ing. Matin Šklíba in 2006. Existing Purpose-built geodetic control Býčí skála and previous measuring for past 15 years was used for accuracy assessment.

KLÍČOVÁ SLOVA

jeskyně Býčí skála, magnetická indukce, vysílač, přijímač, polygonový pořad a gyroteodolit

KEYWORDS

cave Býčí skála, magnetic induction, transmitter, receiver, traverse and gyrotheodolite



PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně s použitím uvedené literatury v příloženém seznamu a podle připomínek vedoucího své diplomové práce.

V Brně dne 24.5.2013

Radim Skulina

.....

PODĚKOVÁNÍ:

Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radimu Kratochvílovi, Ph.D. za odborné rady, vřelou pomoc a ochotu při tvorbě této práce. A samozřejmě bych z celého srdce rád poděkoval svým kolegům Bc. Tomášovi Dörrerovi a Bc. Josefu Tomášovi za výpomoc při pracích v terénu. Dále bych chtěl poděkovat panu Zdeňku Šereblovi, že si našel čas a byl ochoten testování radiomajáku podstoupit. Na závěr bych chtěl poděkovat své matce za pravopisnou kontrolu.

V Brně dne 24.5.2013

Radim Skulina

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

1 Úvod.....	7
2 Rekognoskace.....	8
3 Národní přírodní rezervace Býčí skála.....	9
3.1 Jeskyně Býčí skála.....	9
4 Jeskynní polygonový pořad.....	11
4.1 Měření délek.....	11
4.1.1 Korekce pro měření délek pásmem.....	13
4.1.2 Přesnost naměřených délek.....	15
4.1.3 Opravy vodorovných délek.....	16
4.2 Měření vodorovných směrů.....	16
4.3 Měření astronomických azimutů.....	17
4.3.1 Gyroteodolit.....	18
4.3.2 Měření gyroteodolitem Gi-B2.....	20
4.3.3 Převod azimutu na směrník.....	24
4.4 Měření převýšení.....	26
4.5 Výpočet polygonového pořadu.....	27
5 Povrchový pologonový pořad.....	29
5.1 Měření délek.....	30
5.2 Měření vodorovných směrů.....	31
5.3 Měření zenitových úhlů a výpočet převýšení.....	31
5.4 Výpočet povrchového polygonového pořadu.....	32
6 Metoda elektromagnetické lokalizace.....	35
6.1 Zaměření.....	38
6.2 Posouzení přesnosti radiomajáku.....	40
7 Ostatní.....	42
8 Závěr.....	43
9 Seznam použitých zdrojů.....	45
10 Seznam obrázků.....	47
11 Seznam tabulek.....	48
12 Seznam příloh.....	49

1 Úvod

Předmětem této diplomové práce bylo posouzení přesnosti elektromagnetické lokalizace podzemních prostor. Testovala se přesnost zařízení, které se jmenuje radiomaják. Toto zařízení funguje na principu elektromagnetické indukce. Lokalita pro testování byla vybrána jeskyně Býčí skála z důvodu již existujícího bodového pole v jeskyni i na povrchu.

Pro otestování bylo nutné zpracovat měření šikmých délek pásmem, vodorovných délek naměřených totální stanicí, vodorovných směrů a převýšení technickou nivelací v jeskyni Býčí skála za posledních 15 let. Dále bylo provedeno usměrnění volného polygonového pořadu v jeskyni pomocí gyroteodolitu Gi-B2 maďarské značky MOM. Na povrchu se zaměřil polygonový pořad mezi body TB 28 a BS501.

Z bodů jeskynního polygonového pořadu a povrchového polygonového pořadu se zaměřily body, jež se provažovaly pomocí radiomajáku. Na závěr byla posouzena přesnost radiomajáku na základě měření autora práce a na základě měření z roku 2006 provedeného Ing. Martinem Šklíbou.

2 Rekognoskace

Rekognoskace proběhla v červenci 2012. Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D. předal bodové pole na povrchu i v jeskyni. Body BS4014 a BS4011A nebyly nalezeny a proto byly znovu stabilizovány roxorem o délce 0,5 m a průměru 0,02 m. Body dostaly nové označení BS4014A a BS4011B.

Byly poskytnuty souřadnice bodů BS501, BS502A, BS503B a BS4007, jež byly určeny z měření Ing. Syrovátkovou z roku 2005 a z měření Ing. Nemerádem z roku 2006. Ing. Syrovátková provedla měření polygonového pořadu mezi trigonometrickým bodem 000934250280 a trigonometrickým bodem 000934250330. Ing. Nemerád provedl měření metodou GPS, souhrnné zpracování obou měření a výpočet předaných souřadnic vyrovnáním. Nadmořské výšky těchto bodů byli poskytnuty z měření technickou nivelací s návazností na bod Kj4-31. Souřadnice trigonometrického bodu 000934250280 a zajišťovacího bodu 000934250281 byly získány z webu cuzk.cz. Body 000934250280 a 000934250281 jsou dále v této práci uváděny pouze jako body 28 a 28.1.

Body v podzemí jsou číslovány řadou BS5xx a body na povrchu jsou číslovány řadou BS4xxx. Výjimkou jsou body BS501 a BS502A, které jsou součástí jeskynního polygonového pořadu, ale nacházejí se již vně útrob jeskyně. Indexy A či B na konci čísla značí, že byl bod poškozen a byl znovu stabilizován na přibližně stejném místě. Pro příklad bod BS4011B je aktuální bod, jež nahradil bod BS4011A, který dříve nahradil bod BS4011.

Tabulka č. 2.1 – Poskytnuté souřadnice

BOD	Y [m]	X [m]	H [m]
BS501	590611,884	1149024,192	308,247
BS502A	590552,022	1149007,364	309,964
BS503B	590497,648	1148993,422	309,481
BS4007	590135,852	1148823,066	

3 Národní přírodní rezervace Býčí skála

Je největší rezervací střední části CHKO Moravského krasu o rozloze 190,76 ha a zaujímá část Josefovského a Křtinského údolí. Jako NPR byla vyhlášena v roce 2003. V rezervaci je zachována řada různých lesních typů odpovídajících rozmanitosti životních podmínek. Mezi nejteplomilnější patří doubravy s dubem pýřitým a mahalebkou obecnou. Nejchladnější lesní typy jsou jedlové bučiny a suťová společenstva s javorem klenem, jilmem horským a s mohutnými jedlemi v chladných dnech údolí. Národní přírodní rezervace chrání krasové jevy vyvinuté v devonských vápencích. [21]

3.1 Jeskyně Býčí skála

Jeskyně Býčí skála leží ve střední části CHKO Moravský kras severně od města Brna, v Křtinském údolí mezi městy Adamov a Křtiny. Spolu s Rudickým propadáním tvoří druhý nejdelší jeskynní systém v České republice o celkové délce přes 13 kilometrů. [22]

První zmínka o jeskyni pochází z roku 1663, kdy o ní píše řeholník zábrdovického kláštera M. A. Vigsel. Z 19. století připomíná pamětní deska návštěvu císaře Františka II. a jeho ženy Marie Terezie. [23]

Od roku 1867 prováděl v jeskyni vykopávky Jindřich Wankel, který zde objevil sídliště z doby paleolitu. Tyto objevy pak byly korunovány nálezem sošky bronzového býčka bratranci Felklovými o dva roky později. [15]

V roce 1920 byl vyčerpán sifon na konci Staré Býčí skály a byla objevena Nová býčí skála s aktivním tokem Jedovnického potoka. [14]

Za druhé světové války vybudovali nacisté ve vstupních prostorách jeskyně podzemní továrnu, čímž došlo k jejich nenávratnému poškození. Po válce byla mezi Býčí skálou a vývěry Jedovnického potoka objevena Sobolova (Barová) jeskyně, a dále v osmdesátých letech byly pomocí štol a potápěčů objeveny Prolomená skála, Proplavaná skála a Májové jeskyně, části jeskyně směřující proti toku Jedovnického potoka směrem k Rudickému propadání. [14]



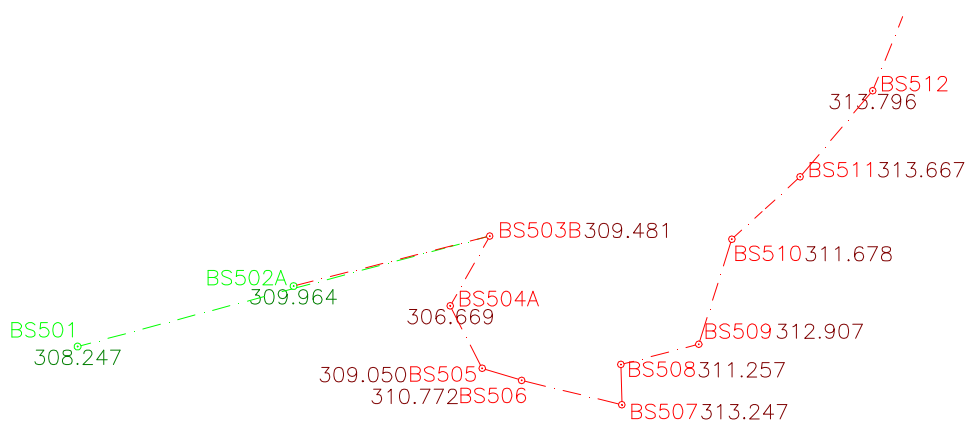
Obrázek č. 3.1 – Vchod do Předsíně jeskyně Býčí skála



Obrázek č. 3.2 – Skalní stěna nad vchodu do jeskyně Býčí skála

4 Jeskynní polygonový pořad

Pro výpočet volného jeskynního polygonového pořadu bylo nutné zpracovat měření šikmých délek ocelovým pásmem, měření vodorovných délek totální stanicí, vodorovných směrů různými teodolity a převýšení různými nivelačními přístroji. Tento skoro 1200 m dlouhý volný polygonový pořad o 50 vrcholech při modelování dosahuje na svém konci velkých hodnot střední chyby polohy v příčném směru, a proto byl tento volný polygonový pořad usměrněn změřením astronomického azimutu.



Obrázek č. 4.1 – Schéma začátku jeskynního volného polygonového pořadu [16]

4.1 Měření délek

Na jeskynním polygonovém pořadu proběhlo měření délek dvojího druhu. Nejprve to bylo měření šikmých délek ocelovým pásmem BMI Rostfrei 50 m. Toto pásmo je měřidlo nestanovené, šedé, s mm dělením, na vidlici, s nulou odsazenou od počátku pásma a jedná se o měřidlo II. třídy přesnosti. První měření proběhlo ve dnech 6. a 7.2.2004 a to mezi body BS503 až BS527. Druhé měření proběhlo 2.12.2008 a to mezi body BS527 až BS553. K měření délek bylo použito kladkového závěsu s napínacím závažím o hmotnosti 5,5 kg. Všechny délky byly měřeny minimálně čtyřikrát a to s odsazením počátku pro získání nezávislých hodnot. V průběhu měření byla zaznamenávána teplota. Úkolem této práce bylo všechny tyto naměřené délky opravit o patřičné korekce, převést je na vodorovné a zjistit jejich přesnost v podobě střední chyby naměřené délky.

Druhý způsob měření délek na jeskynním polygonovém pořadu bylo měření pomocí totální stanice TOPCON GPT – 3003N s výrobním číslem 313632. Délky byly měřeny vodorovné, hned byly ve stroji opraveny o fyzikální korekce, o korekce z převodu na nulový horizont a převedeny do roviny kartografického zobrazení. Tyto délky už tedy nebyly nijak upravovány pro výpočet. Délky byly měřeny čtyřikrát a to obousměrně.

Délka mezi body BS503B a BS504A byla změřena Ing. Radimem Kratochvílem 5.4.1998 přístrojem LEICA TC800 s výrobním číslem 407818. Tato délka byla měřena dvakrát.

Měření délek totální stanicí proběhlo z důvodu zhoršující se přesnosti délek měřených pásmem nad 30 m. Pro takto dlouhé vzdálenosti začíná být přesnější a hlavně méně náročnější využití dálkoměru. U délky mezi body BS529 a BS530 se pásmo v určitých místech dotýkalo země. Od měření totální stanicí se lišila o 4 cm, a proto byla použita pouze délka měřená totální stanicí. Mezi body BS542 a BS543 byla délka rovněž měřena oběma způsoby a byla spočítána váženým průměrem podle vzorce 4.1 a jeho přesnost podle vzorce 4.2, kde s je délka se svojí vahou p , v je oprava od váženého průměru a n je počet měření. [3] Výpočet je součástí přílohy č.4.

$$s = \frac{\sum p_i * s_i}{\sum p_i} \quad m_s = \sqrt{\frac{\sum p * v * v}{p * (n - 1)}} \quad (4.1)(4.2)$$



Obrázek č. 4.2 – Totální stanice TOPCON GPT – 3003N [19]

Obrázek č. 4.3 – Totální stanice LEICA TC800 [18]

4.1.1 Korekce pro měření délek pásmem

Tabulka č. 4.1 – Parametry pro pásmo BMI Rostfrei

PARAMETRY	HODNOTA	JEDNOTKA
Délka stuhu:	50,6	[m]
Šířka:	0,01	[m]
Tloušťka:	0,0002	[m]
Průřez:	2,6	[mm ²]
Hustota:	7500	[kg/m ³]
Koeficient tep.roztažnosti:	1,02E-05	[°C ⁻¹]
Modul pružnosti:	20	[kg/m ²]
Hmotnost stuhu:	1	[kg]
Měrná délková hmotnost:	0,02	[kg/m]
Zatížení	5,5	[kg]

V tabulce č 4.1 jsou parametry pásma, které jsou potřeba pro výpočet všech korekcí pro převod na vodorovnou délku. Jsou to korekce z komparace, z teploty, z protažení, z průvěsu a z převýšení. Korekci z vybočení ze směru nemusíme zavádět, protože žádná délka nebyla měřena na více než jeden klad pásma.

a) Korekce z komparace (nesprávné délky pásma) C_1 a její střední chyba m_{C1} :

$$C_1 = \Delta l \quad m_{C1} = 0,3 + 0,007 * s \quad (4.3)(4.4)$$

Kde s je naměřená šikmá délka a Δl je odchylka pásma od nominální hodnoty. [1, 4] Pro získání této korekce a její střední chyby jsem využil kalibrační list číslo 25996/2006 pořízený 5.12.2006 akreditovanou kalibrační laboratoří ve Zdibech. Největší hodnota korekce byla dosažena -1,6 mm a střední chyba pro ty nejdelší vzdálenosti je 0,7 mm.

b) Korekce z teploty C_2 a její střední chyba m_{C2} :

$$C_2 = s * \alpha * (t - t_0) \quad m_{C2} = s * \alpha * m_t \quad (4.5)(4.6)$$

Kde s je naměřená šikmá délka, α je koeficient délkové teplotní roztažnosti, t je teplota pásma při měření, t_0 je teplota pásma při komparaci a m_t je střední chyba měření teploty pásma zvolena 1°C. [1, 4] Největší hodnota korekce byla dosažena -5,3 mm a střední chyba pro ty největší vzdálenosti je 0,5 mm.

c) Korekce z protažení C_3 a její střední chyba $m_{C3,4}$:

$$C_3 = s * \frac{m * g - F_0 + \frac{1}{2} * g * l * \rho * \cos z}{q * E} \quad (4.7)$$

$$m_{C3,4} = \left(\frac{l}{E * q} + \frac{l^3 * (q * E)^2}{12 * (m * g)^3} \right) * m_F \quad (4.8)$$

Kde m je zatížení napínacího závaží, g je gravitační konstanta $9,81 \text{ m} * \text{s}^{-2}$, F_0 napínací síla při komparaci, ρ je hustota oceli, z je zenitový úhel z bodu na kterém bylo umístěno závaží, q je průřez, E je modul pružnosti a m_F je střední chyba určení napínací síly zvolena $0,5 \text{ N}$. [1, 4] Největší hodnota korekce byla dosažena $3,8 \text{ mm}$ a střední chyba pro ty největší vzdálenosti je $1,3 \text{ mm}$.

d) Korekce z průvěsu C_4 :

$$C_4 = \frac{-s^3}{24} * \frac{\rho * g * \sin z}{m * g + \frac{1}{2} \rho * g * s * \cos z} \quad (4.9)$$

Největší hodnota korekce byla dosažena $-57,1 \text{ mm}$ a střední chyba pro ty největší vzdálenosti je $1,3 \text{ mm}$.

e) Korekce z převýšení C_5 a její střední chyba m_{C5} :

$$C_5 = \sqrt{s^2 - h^2} - s \quad m_{C5}^2 = \frac{C_5^2}{s^2 - h^2} * m_{s(N)}^2 + \frac{h^2}{s^2 - h^2} * m_h^2 \quad (4.10)(4.11)$$

Kde h je převýšení převýšení mezi body a m_h je střední chyba stanoveného převýšení. [1, 4] Největší hodnota korekce byla dosažena $-871,2 \text{ mm}$ a střední chyba pro ty nejkratší vzdálenosti je $0,2 \text{ mm}$.

Aritmetický průměr naměřených délek se opraví o systematický vliv podle vzorce 3.10.

$$s = s' + \sum C_i \quad (4.12)$$

4.1.2 Přesnost naměřených délek

Tabulka č. 4.2 – Přesnost naměřených délek ocelovým pásmem

DÉLKY	$m_{s(N)}$ [m]	n
0-10 m	0,0003	8
10-20 m	0,0005	16
20-30 m	0,0012	13
30-40 m	0,0018	5
40-50 m	0,0018	2

DÉLKY	m_{c1} [m]	m_{c2} [m]	$m_{c3,4}$ [m]	m_{c5} [m]	m_s [m]
0-10 m	0,0004	0,0001	0,0000	0,0002	0,0005
10-20 m	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001	0,0007
20-30 m	0,0005	0,0003	0,0003	0,0001	0,0014
30-40 m	0,0006	0,0004	0,0007	0,0000	0,0020
40-50 m	0,0007	0,0005	0,0013	0,0000	0,0024

Tabulka číslo 4.2 obsahuje střední chyby m_s pro měřené délky pásmem, které vstupují do výpočtu. Střední chyby jsou společné podle velikosti jednotlivých délek po 10 metrech. Střední chyba měřené délky pásmem se vypočte podle vzorce 4.13, kde m_c vyjadřuje vliv systematických chyb, který se vypočte podle vzorce 4.14. Jednotlivé složky vzorce 4.14 jsou popsány výše a n je počet kladů pásma, v tomto případě je rovno 1. [4]

$$m_s^2 = m_c^2 + m_{s(N)}^2 \quad m_c^2 = m_{c1}^2 + m_{c2}^2 + n * m_{c3,4}^2 + m_{c5}^2 \quad (4.13)(4.14)$$

$$m_{s(N)} = \sqrt{\frac{\sum v * v}{n * (n - 1)}} \quad (4.15)$$

Složka $m_{s(N)}$ obsahuje vliv náhodných chyb a vypočte se pomocí vzorce 4.15, kde v jsou opravy měřených délek od aritmetického průměru a n je počet měření. Jedná se tedy o střední chybu aritmetického průměru. [3]

Přesnost vodorovné délky naměřené totální stanicí TOPCON GPT – 3003N se převzala od výrobce. Pro tyto délky byla počítána pro kontrolu i $m_{s(N)}$ dle vzorce 4.15, ale hodnota nebyla dále použita. Délky byly měřeny osmkrát a jejich střední chyba délky se vypočte dle vzorce 4.16.

$$m_s = 3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \quad (4.16)$$

Přesnost vodorovné délky naměřené totální stanicí LEICA TC800 se převzala od výrobce. Délky byly měřeny dvakrát a jejich střední chyba délky se vypočte dle vzorce 4.17.

$$m_s = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \quad (4.17)$$

4.1.3 Opravy vodorovných délek

Vodorovné délky opravené o systematické chyby se dále ještě musí převést na nulový horizont a převést do roviny kartografického zobrazení.

$$s_0 = \frac{s * R}{(R + H)} \quad s_{S-JTSK} = s_0 * m_0 \quad (4.18)(4.19)$$

R je poloměr Země, který byl použit 6 380 703 m, který je použit pro výpočet Křovákova zobrazení. H je nadmořská výška, m_0 je hodnota délkového zkreslení, která může dosahovat hodnoty až 13 cm/km. Hodnota délkového zkreslení, která byla použita při výpočtech je rovna 0,9999005 a byla vypočítána v softwaru Groma 7. [8] [20]

Délky s_{S-JTSK} vstupují do výpočtů, hodnoty korekcí a střední chyby těchto délek jsou součástí přílohy č. 1.

4.2 Měření vodorovných směrů

K výpočtu jeskynního polygonového pořadu byly k dispozici měření horizontálních směrů z různých období, provedené různými přístroji a různými lidmi. Mezi nejstarší měření patří měření provedené Ing. Radimem Kratochvílem, Ph.D. v letech 1997 až 2000 vojenským teodolitem WILD se skleněnými kruhy a půlminutovým dělením optického mikrometru z 40. let 20 století. Měření se provádělo ve dvou polohách v jedné skupině. Na některých bodech byly provedeny skupiny 2. Od roku 2003 se začaly měřit vodorovné směry studenty 5. ročníku popřípadě 2. ročníku navazujícího magisterského studia VUT v Brně FAST v rámci předmětu Speleologické mapování. Studenti používali přístroj THEO 020A či TOPCON GPT-3003N a měřili ve dvou polohách jednu či dvě skupiny. Díky těmto studentům vznikl soubor měření, kde na každém bodě jeskynního polygonového pořadu je měřen úhel mezi předcházejícím a následujícím bodem ve dvou až pěti skupinách. Veškeré naměřené hodnoty jsou součástí přílohy č.1. Hodnoty označené červeně nebyly použity pro výpočet z důvodu velkých odchylek od průměrné hodnoty naměřených směrů.

Střední chyba měřených úhlů je vypočtena empiricky ze vzorce 4.20 a střední chyba měřeného směru ze vzorce 4.21. [3] Průměrná střední chyba měřeného úhlu, která byla použita pro výpočet je 43^{cc}.

$$m_{\omega} = \sqrt{\frac{\sum v * v}{n * (n - 1)}} \quad m_{\psi} = \frac{m_{\omega}}{\sqrt{2}} \quad (4.20)(4.21)$$

Na stanoviscích BS546 až BS551A vznikl rozdíl mezi měřením Ing. Radima Kratochvíla, Ph.D a měřením studentů z důvodu centrace na jiné místo těchto stabilizovaných znaků. Rozdíly úhlů se pohybují řádově v grádových minutách. Proto výpočet souřadnic bodů BS547 až BS553 proběhl dvakrát s dvěma různými hodnotami úhlů a tyto souřadnice byly posléze zprůměrovány. Body BS547 až BS553 jsou tedy ve výpočtech indexovány s jednou čárkou a s dvěma čárkami a po zprůměrování těchto hodnot jsou tyto indexy smazány. Veškeré směry, které byly použity pro výpočet, jsou součástí přílohy č. 1.

4.3 Měření astronomických azimutů

Jeskynní polygonový pořad je pouze volný, protože jeskyně nemá na konci druhý východ. Příčná chyba přenášející se v závislosti na měřených úhlech se dá eliminovat magnetickým nebo astronomickým usměrněním. Usměrnění je měření směrníků stran v průběhu polygonového pořadu.

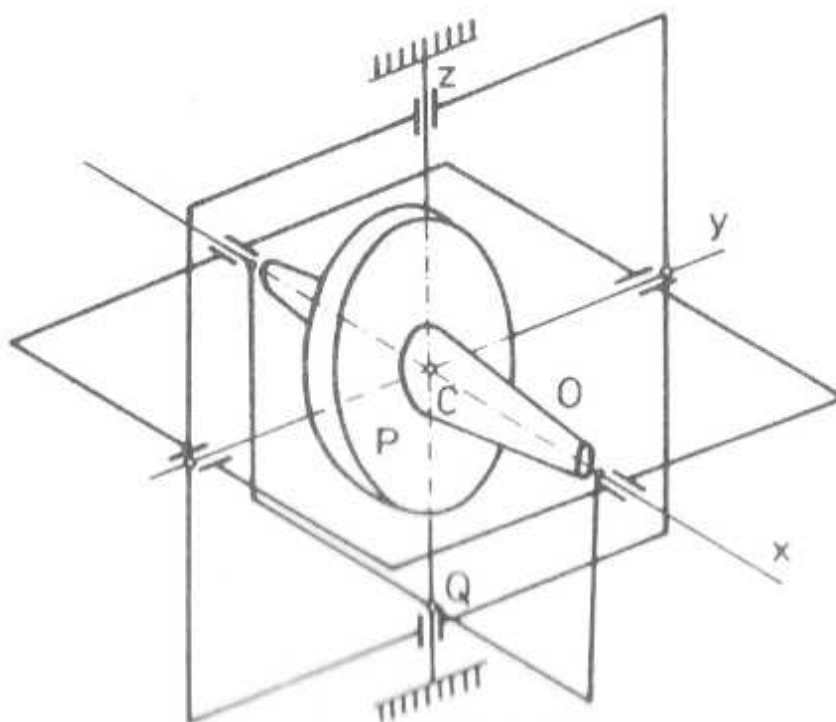
Magnetické usměrnění v jeskyni Býčí skála nepřichází v úvahu, protože se v jeskyni nachází spousta železného materiálu a v blízkosti bodu BS501 stojí auta. Při protisměrném měření magnetických azimutů převedených na směrník dochází i k rozdílu půl grádového stupně. [5] Proto bylo pro usměrnění volného jeskynního polygonového pořadu zvoleno usměrnění pomocí směrníků, získaných měřením astronomických azimutů gyroteodolitem.

Měření astronomických azimutů proběhlo 1.5.2013 pomocí gyroteodolitu MOM Gi-B2 výrobního čísla 102499. Měření proběhlo na bodech BS503B, BS530, BS544 a znovu na bodě BS503B. Na bodě BS503B proběhlo měření dvakrát, protože azimuty na zbylých bodech byly počítány relativně k výchozí straně BS503B-BS501 a bylo nutné zkontrolovat první měření. Naměřené hodnoty jsou součástí přílohy č. 1.

Na základě měření na bodě BS503B jsem vypočítal, že rozdíl mezi naměřeným směrníkem a vypočítaným směrníkem ze zadaných souřadnic je 0,0017°. Tuto hodnotu jsem přičetl ke zbylým dvěma směrníkům použitých pro vyrovnání. Výpočet je součástí přílohy č. 4.

4.3.1 Gyroteodolit

Jedná se o úhломěrný přístroj skládající se z gyrokompasu a teodolitu měřící astronomický azimut. Směr astronomického severu se ve stroji vytváří pomocí gyrokompasu. Vodorovné směry čteme na kruhu teodolitu. Teoretický základ gyrokompasu je vázán na objevy L. Foucaulta z 19. století. Když se proloží osa x osou gyrokompasu O , viz obrázek 4.4, v kardanovém závěse a zůstane-li tak při vysoké rychlosti otáčení setrvačníku ve vodorovné rovině, tak při pohybu nosiče závěsu, vlivem rotace Země, se bude osa gyrokompasu snažit precesním pohybem zaujmout směr k astronomickému severu. V padesátých letech 20. století tuto teorii rozvíjel Vsesvazový vědecko-výzkumný ústav důlního měřičství v tehdejší Leningradu a o další rozvoj se zasloužila maďarská firma MOM. Gyrokompas je gyroskop s dvěma stupni volnosti na ose x a z . Na pohon gyrokompasu se používá trojfázový vysokootáčkový elektromotor s velkým otáčivým momentem. [9]



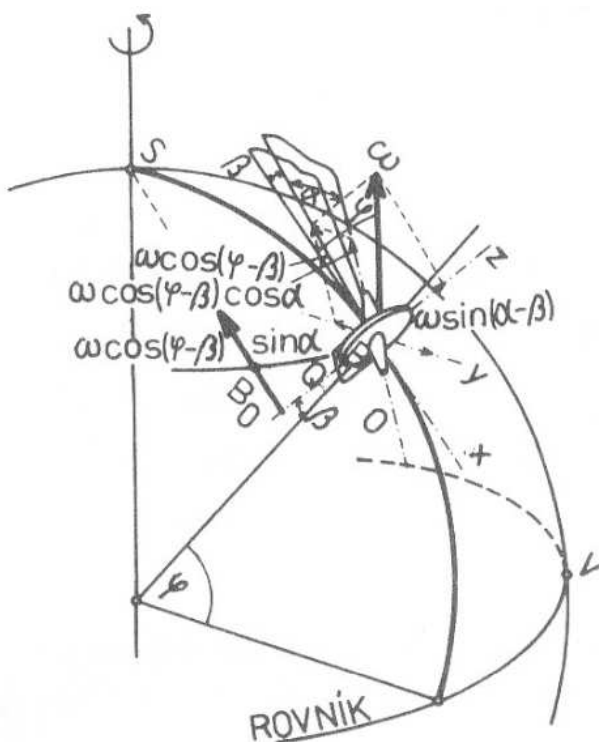
Obrázek č. 4.4 – Gyroskop [9]

Při roztočení setrvačníku na 20 až 30 tisíc otáček má tendenci zaujmout gyrokompas polohu v rovině místního poledníku. Při otáčení Země se gyrokompas snaží, díky Foucaultovu zákonu, zachovat svoji prostorovou polohu. Rotace Země okolo

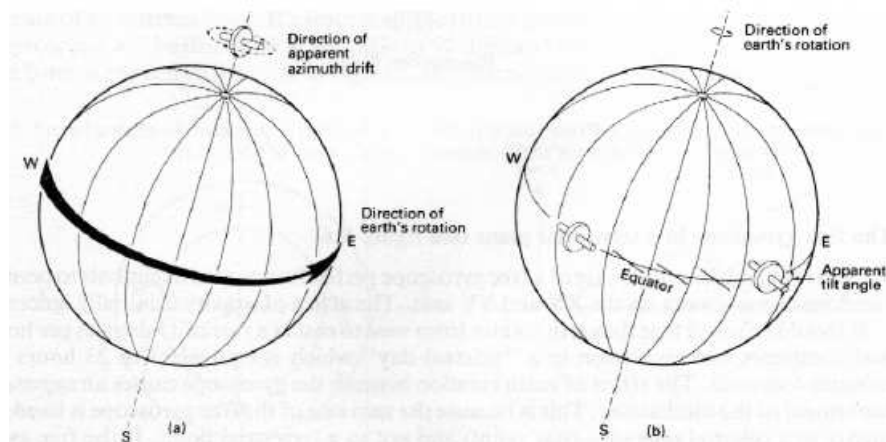
své osy úhlovou rychlostí vytváří usměrňovací moment gyrokompasu okolo osy z. Reálné uplatnění gyroteodolitů je pro zeměpisné šířky menší než 86 grádových stupňů. [9]

Pokud setrvačník nerotuje, ustálí se po (dlouhém) čase do takové polohy, která odpovídá nezkroucenému závěsu. Tato rovnovážná poloha způsobí, že závěs má nulový zkrut neboli nulovou torzi a tím definuje základní orientaci gyroskopu vůči alhidádě teodolitu, kterou je třeba znát, aby bylo možno přenést směr osy setrvačníku na čtení kruhu. [7]

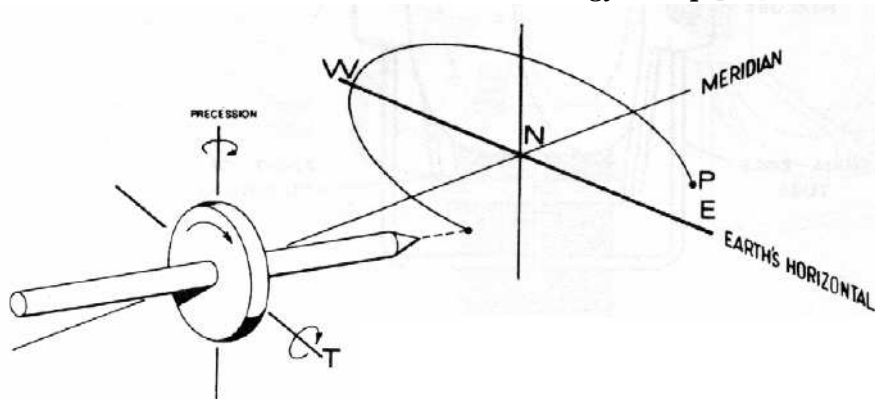
Jakmile setrvačník začne rotovat, překoná gyroskopický efekt torzi závěsu a gyroskop se bude snažit stočit svou osu na sever. I tento pohyb je tlumeným kýváním kolem rovnovážné polohy a k ustálení je třeba velmi dlouhé doby. Zkroucený závěs by ovšem způsobil systematickou chybu v orientaci, a proto je třeba otáčením alhidády sledovat pohyb gyroskopu a tak udržovat závěs bez zkrutu. Díky foto-diodě umístěné v gyroteodolitu Gi-B2 není třeba alhidádou otáčet pro udržení závěsu bez zkrutu. [7]



Obrázek č. 4.5 – Princip činnosti gyrokompasu [9]



Obrázek č. 4.6 – Vliv rotace Země na gyroskop [10]



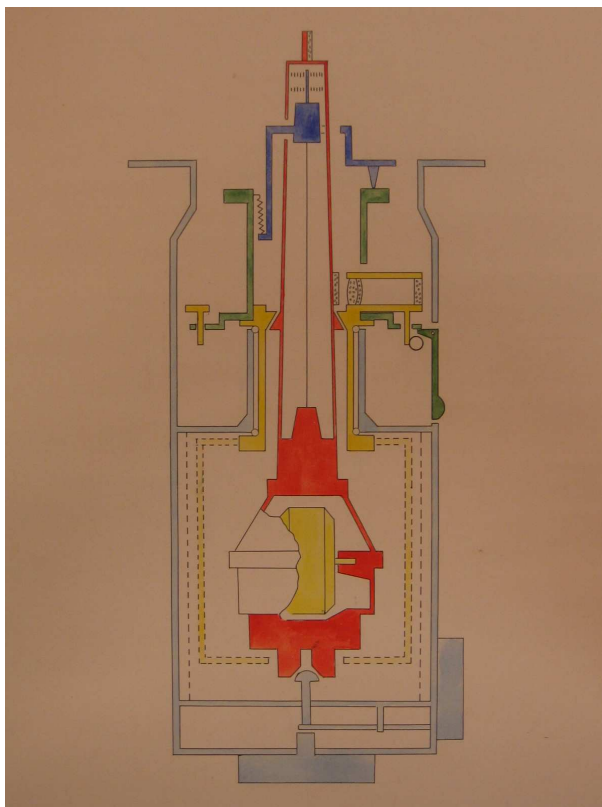
Obrázek č. 4.7 – Chování gyroskopu [10]

4.3.2 Měření gyroteodolitem Gi-B2

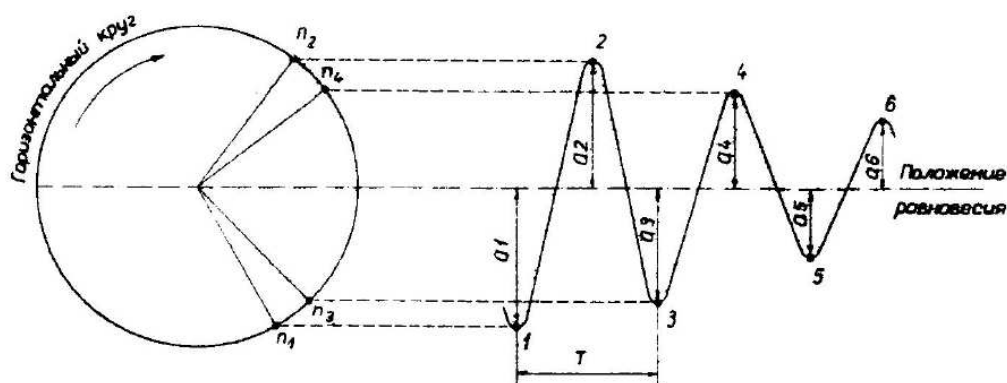
Postup pro měření s gyroteodolitem Gi-B2 je takový, že po zcentrování a zhorizontování přístroje se přečte čtení na vodorovném kruhu v obou polohách na orientační bod. Nastaví se na horizontálním kruhu hodnota magnetického azimutu a servomotorem se zkoincidují stupnice gyroteodolitu na sebe. Zapne se foto-dioda, čímž se docílí kolmosti zrcátek žluté části gyroteodolitu na oranžovou (viz obrázek č. 4.8). Vyvěsí se setrvačnick a určí se nulová torzní poloha pomocí metody čtyř kyvů. Nechá se roztočit setrvačnick a určí se směr astronomického severu pomocí metody čtyř kyvů. Zabrzdí se setrvačnick. Znovu se určí nulová torzní poloha a na závěr se znovu přečte čtení na vodorovném kruhu v obou polohách na orientační bod. [7]

Nulová torzní poloha je odchýlení rovnovážné polohy volně zavěšeného

setrvačníku vůči alhidádě následkem drobných deformací závěsu způsobených neopatrnou obsluhou a běžným provozem. Měření azimutu by bylo zatíženo touto chybou a proto se musí nulová torzní poloha měřit před začátkem měření a na jeho konci. Nulová torzní poloha se určí čtením 4 volných kyvů. [1]



Obrázek č. 4.8 – Schéma gyroteodolitu Gi-B2 [7]

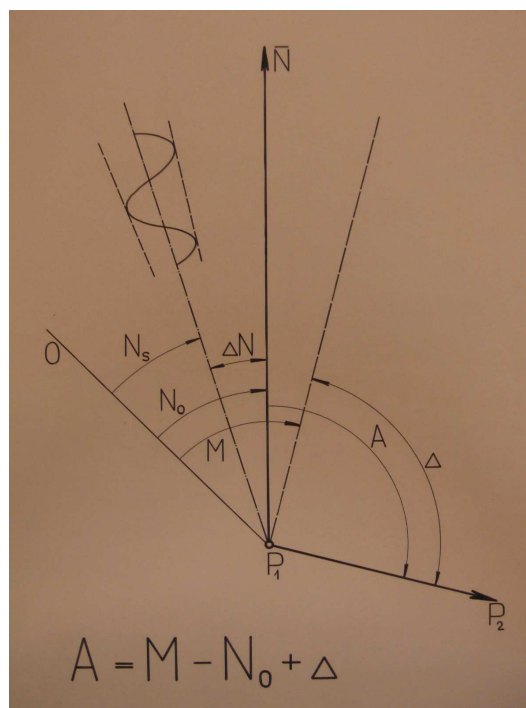


Obrázek č. 4.9 – Metoda 4 kyvů [7]

Princip metody 4 kyvů spočívá v přečtení 4 po sobě následujících vratných poloh kyvů. Výsledná ustálená poloha se získá postupným průměrováním dvojic čtení viz vzorce 4.22. Obyčejný aritmetický průměr 4 kyvů se udělat nedá, protože by rovnovážná poloha byla vychýlena na stranu prvního kyvu. [1]

$$\begin{aligned} n_{12} &= (n_1 + n_2)/2, & n_{23} &= (n_2 + n_3)/2, & n_{34} &= (n_3 + n_4)/2; \\ n_{123} &= (n_{12} + n_{23})/2, & n_{234} &= (n_{23} + n_{34})/2; \\ n &\equiv n_{1234} = (n_{123} + n_{234})/2. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Astronomický azimut se získá ze vztahu na obrázku 4.10. Kde N_0 je ustálený směr astronomického severu, který je opravený o nulovou torzní polohu. Hodnota M je průměrná hodnota čtení vodorovného kruhu na orientační bod. Torzní konstanta, kterou se násobí hodnota nulové torzní polohy, než se přičte k ustálenému směru severu, je v tomto případě rovna $-19,6^{\text{cc}}$. Hodnota nulové torzní polohy byla využita vždy jen ta po měření. Hodnota před měřením je zatížena vlivem transportu a měření by znehodnocovala. Hodnota Δ je konstanta určená výrobcem tzv. přístrojová konstanta v tomto případě je rovna $100,5451^{\text{s}}$. [7]



Obrázek č. 4.10 – Výpočet astronomického azimutu [7]

Obrázek č. 4.11 – Gyroteodolit firmy MOM Gi-B2



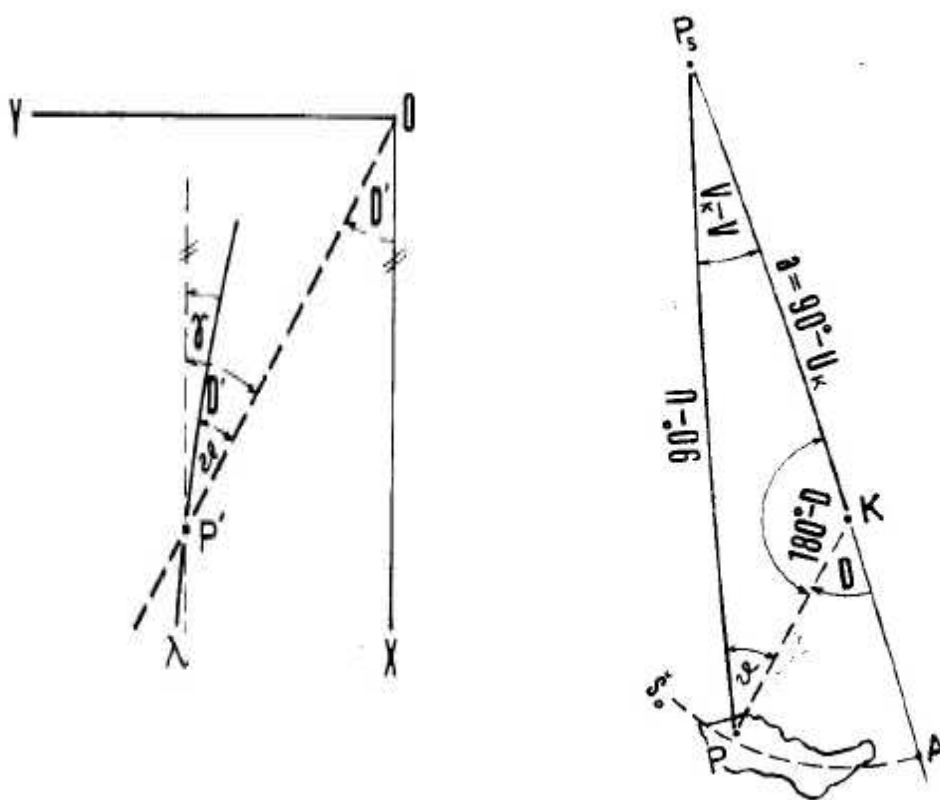
Obrázek č. 4.12 – Měření s gyroteodolitem firmy MOM Gi-B2 v jeskyni Býčí skála



Obrázek č. 4.13 – Kompletní sada gyroteodolitu Gi-B2 v laboratoři B150

4.3.3 Převod azimutu na směrník

Pro převod azimutu na směrník musíme znát hodnotu meridiánové konvergence, což je úhel mezi souřadnicovou osou X a místním poledníkem viz obrázek 4.15, kde je meridiánova konvergence označena písmenem γ . Meridiánová konvergence se mění v závislosti na poloze a na území ČR pro S-JTSK může dosahovat až 10° . Pro výpočet meridiánové konvergence využijeme sférický trojúhelník na obrázku 4.14. [11]



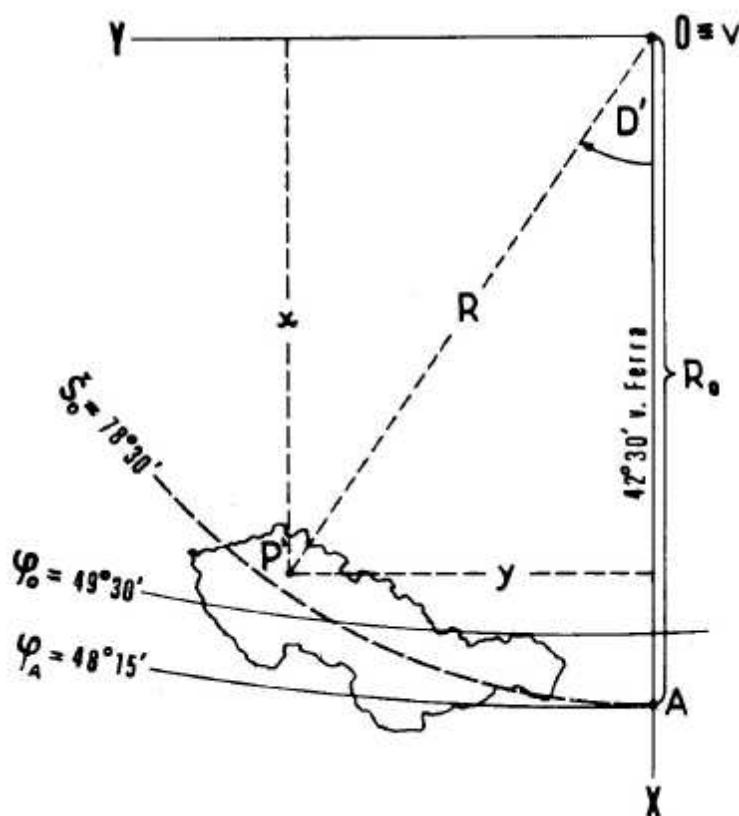
Obrázek č. 4.14 – Sférický trojúhelník [11]

Obrázek č. 4.15 – Meridiánová konvergence [11]

Meridiánová konvergence γ se vypočítá podle vzorce 4.26. Vzorce 4.23, 4.24 a 4.25 jsou odvozeny z obrázků 4.14 a 4.16. Hodnota a je konstanta pro Křovákovo zobrazení a je rovna $30^\circ 17' 17,3031''$. Y a X jsou souřadnice bodů v S-JTSK, hodnota U je zeměpisná šířka na kouli, D je kartografická délka a D' je směrník. Hodnota \check{S}_0 je základní kartografická rovnoběžka a je rovna $78^\circ 30'$.

$$D = \frac{D'}{\sin S_0} \quad tg D' = \frac{Y}{X} \quad (4.23)(4.24)$$

$$\sin v = \frac{\sin D}{\cos U} * \sin a \quad \gamma = D' - v \quad (4.25)(4.26)$$



Obrázek č. 4.16 – Polární souřadnice [11]

Zeměpisná šířka na kouli U byla vypočtena ze zeměpisné šířky získané ze serveru mapy.cz, která je zobrazena na elipsoidu WGS84. Zeměpisná šířka na elipsoidu WGS84 je v příloze č. 4 označena jako φ . Vypočtené meridiánové konvergence jsou součástí přílohy č. 4. V zápisnících a ve výpočtech je meridiánová konvergence označena písmenem c.

4.4 Měření převýšení

K výpočtu jeskynního polygonového pořadu byly k dispozici měření převýšení z různých období, měřena různými přístroji a různými lidmi. Mezi nejstarší měření patří měření provedené Ing. Radimem Kratochvílem, Ph.D. na přelomu let 1996 a 1997 vojenským teodolitem WILD se skleněnými kruhy a půlminutovým dělením optického mikrometru z 40. let 20 století. Roku 1998 provedl Ing. Radim Kratochvíl, Ph.D. další měření již kompenzátorovým nivelačním přístrojem MEOPTA MNK 20 s výrobním číslem 204. Měření se provádělo metodou technické nivelace vždy tam a zpět. Od roku 2003 se začala měřit převýšení studenty 5. ročníku popřípadě 2. ročníku navazujícího magisterského studia VUT v Brně FAST v rámci předmětu Speleologické mapování. Studenti používali kompenzátorové nivelační přístroje SOKKIA C40 s výrobními čísly 057736 a 056138. Díky těmto studentům vznikl soubor měření, kde mezi každými dvěma sousedními body jeskynního polygonového pořadu je měřeno vždy minimálně jednou až čtyřikrát převýšení technickou nivelací tam a zpět. Veškeré naměřené hodnoty jsou součástí přílohy č. 1. Hodnoty označené červeně nebyly použity pro výpočet z důvodu velkých odchylek od průměrné hodnoty naměřených převýšení.

Střední chyba měřených převýšení je vypočtena empiricky ze vzorce 4.20. Průměrná střední chyba měřeného převýšení, která byla použita pro výpočet je 0,8 mm. [3]

$$m_h = \sqrt{\frac{\sum v * v}{n * (n - 1)}} \quad (4.27)$$



Obrázek č. 4.17 – Nivelační přístroj SOKKIA C40 [17]

4.5 Výpočet polygonového pořadu

Pro výpočet jeskynního polygonového pořadu bylo nutno nejprve provést usměrnění. Usměrňovalo se spočítaným váženým průměrem směrniců z měření gyroteodolitem a z měření vodorovných úhlů. Celý volný polygonový pořad byl rozdělen na tři úseky. První je mezi body BS503B a BS530 a směrnic $\sigma_{BS530,BS529}$ se spočítá ze vztahů 4.28, 4.29, 4.30 a 4.31. Druhý úsek je mezi body BS530 a BS544 a směrnic $\sigma_{BS544,BS543}$ se spočítá ze vztahů 4.28, 4.29, 4.31 a 4.32. Třetí úsek mezi body BS544 a BS553 se již nijak neusměrňuje.

$$\sigma = \frac{p_1 * \sigma_1 + p_2 * \sigma_2}{p_1 + p_2} \quad m_\sigma = \frac{m_{\sigma_1} * m_{\sigma_2}}{\sqrt{m_{\sigma_1}^2 * m_{\sigma_2}^2}} \quad (4.28)(4.29)$$

$$m_{\sigma_2} = m_\omega * \sqrt{n} \quad p_i = \frac{1}{m_{\sigma_i}} \quad (4.30)(4.31)$$

$$m_{\sigma_2} = \sqrt{m_{\sigma_0}^2 + m_\omega^2 * n} \quad (4.32)$$

Nejprve se pomocí vzorce 4.30 vypočte střední chyba směrníku vypočteného z měření vodorovných úhlů, kde n je počet vrcholových úhlů. Vzorec 4.32 již zohledňuje chybu výchozího směrníku a je použit pro výpočet střední chyby směrníku z měřených vodorovných úhlů pro druhý úsek. Poté se vypočtou váhy směrníků ze vztahu 4.31. Váženým průměrem se spočítá hodnota usměrněného směrníku pomocí vztahu 4.28 a jeho střední chyba pomocí vztahu 4.29. [12]

$$\sigma_k = \sigma_0 + \sum \omega_j + \frac{k}{n} (\sigma_n - \sigma_0 - \sum \omega_i + 2R * (n-1)) - 2R * (k-1) \quad (4.33)$$

$$m_{\sigma_k}^2 = \left(1 - \frac{k}{n}\right)^2 * m_{\sigma_0}^2 + \left(\frac{k}{n}\right)^2 * m_{\sigma_n}^2 + \frac{k}{n} (n-k) * m_\omega^2 \quad (4.34)$$

Pro výpočet směrníků mezilehlých bodů jsem použil vzorce 3.33 a 3.34. σ_0 a σ_n jsou neměnné směrníky počáteční a koncové strany úseku, ω jsou měřené vrcholové úhly, n je počet měřených vrcholových úhlů v úseku a k je pořadové číslo strany v úseku. Směrníky třetího úseku se nijak nevyrovnávají a jejich střední chyba se vypočte ze vztahu 4.32. [12]

Střední chyba měřeného úhlu m_ω byla použita 43^{cc} viz kapitola 4.2 a střední chybu měřeného směrníku m_σ gyroteodolitem 50^{cc} po domluvě s vedoucím práce.

S vyrovnanými směrníky se vypočítaly souřadnice jednotlivých bodů jeskynního polygonového pořadu s charakteristikami přesnosti podle vzorců 4.35 až 4.39. Střední chyba výšky se vypočte dle vztahu 4.40, kde n je počet měřených převýšení.

$$X_i = X_{BS503B} + \sum s_i \cdot \cos \sigma_i \quad Y_i = Y_{BS503B} + \sum s_i \cdot \sin \sigma_i \quad (4.35)(4.36)$$

$$m_{X_i}^2 = \sum \cos^2 \sigma_i \cdot m_{s_i}^2 + \sum \Delta Y^2 \cdot m_{\omega_i}^2 \quad (4.37)$$

$$m_{Y_i}^2 = \sum \sin^2 \sigma_i \cdot m_{s_i}^2 + \sum \Delta X^2 \cdot m_{\omega_i}^2 \quad (4.38)$$

$$m_{X,Y} = \sqrt{\frac{m_X^2 + m_Y^2}{2}} \quad (4.39)$$

$$m_H = m_h \cdot \sqrt{n} \quad (4.40)$$

Pro výpočet parametrů elips chyb se dále spočítala kovariance podle vztahu 4.41. Parametry elips chyb jsou m_{\max} , m_{\min} a úhel stočení φ a spočítají se ze vztahů 4.42, 4.43 a 4.44. [4, 13]

$$m_{XY} = \sum \sin \sigma_i \cdot \cos \sigma_i \cdot m_{s_i}^2 - \sum \sin \sigma_i \cdot \cos \sigma_i \cdot m_{\sigma_i}^2 \quad (4.41)$$

$$2\varphi = \arctg \frac{2m_{xy}^2}{m_x^2 - m_y^2} \quad (4.42)$$

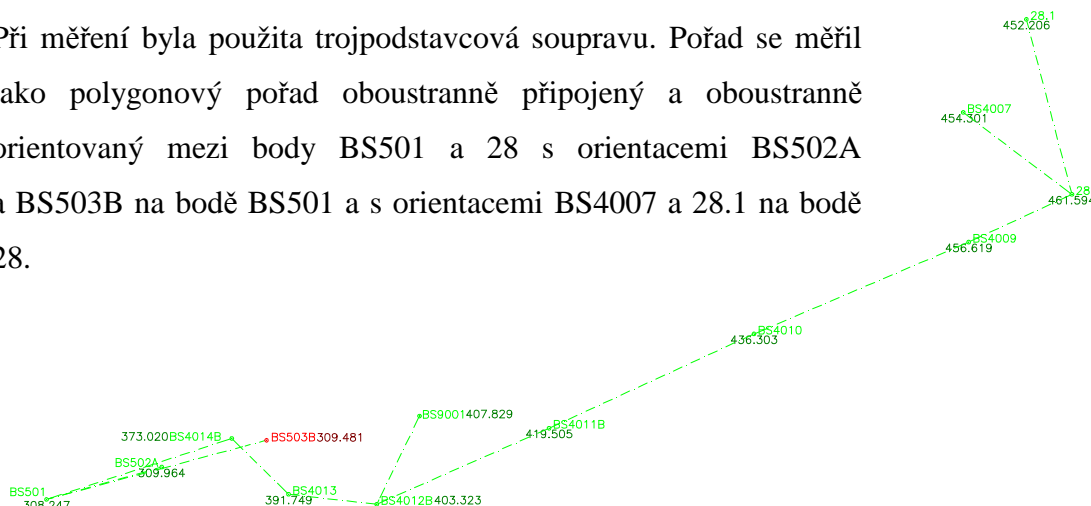
$$m_{\max}^2 = \frac{m_x^2 + m_y^2}{2} + \sqrt{\frac{(m_x^2 - m_y^2)^2}{4} + m_{xy}^4} \quad (4.43)$$

$$m_{\min}^2 = \frac{m_x^2 + m_y^2}{2} - \sqrt{\frac{(m_x^2 - m_y^2)^2}{4} + m_{xy}^4} \quad (4.44)$$

Veškeré výpočty jsou součástí přílohy č. 4.

5 Povrchový poloronový pořad

Povrchový poloronový pořad byl měřen 17.4.2013 totální stanicí LEICA TC 1700 s výrobním číslem 413682. Při měření byla použita trojpodstavcová souprava. Pořad se měřil jako poloronový pořad oboustranně připojený a oboustranně orientovaný mezi body BS501 a 28 s orientacemi BS502A a BS503B na bodě BS501 a s orientacemi BS4007 a 28.1 na bodě 28.



Obrázek č. 5.1 – Schéma poloronového pořadu oboustranně připojeného a oboustranně orientovaného [16]



Obrázek č. 5.2 – Měření poloronu totální stanicí LEICA TC1700

5.1 Měření délek

Šikmé délky byly měřeny čtyřikrát a to obousměrně. Pro eliminaci systematických chyb se 12.4.2013 v laboratoři B150 měřila součtová konstanta pro každý použitý hranol a rozdíl výšek mezi středem hranolu a točnou osou dalekohledu totální stanice. Tento rozdíl výšek se promítne i při opravách zenitových úhlů v kapitole 5.3. Při nastavení součtové konstanty 0,0 mm vyšla pro všechny hranoly součtová konstanta 0,0 mm a tudíž není třeba zavádět žádnou korekci. Co se týče výškového rozdílu mezi hranolem a totální stanicí, který dosahuje maximálně 0,7 mm se na měřených délkách projeví opravou maximálně 0,2 mm, ale i přesto se tato korekce zavedla. Oprava měřené šikmé délky se vypočte podle vztahu 5.2 a podle vztahu 5.1 se vypočte středový úhel nutný pro vztah 5.2. [2]

$$\varphi = 2 \arctan\left(\frac{D}{2 * R}\right) \quad s' = s'_{MÉR} + \Delta h * \cos(Z - \varphi) \quad (5.1)(5.2)$$

Korigovanou šikmou délku převedu na vodorovnou pomocí vzorce 5.3, kde z je zenitový úhel již opravený o všechny korekce. [2]

$$s = s' \cdot \frac{\sin(\varphi + z)}{\cos(\varphi / 2)} \quad (5.3)$$

Zbylé korekce jako převedení vodorovné délky na nulový horizont a převod do roviny kartografického zobrazení jsem provedl podle vzorců 4.18 a 4.19 v kapitole 4.1.3. Ještě před převodem vodorovné délky do roviny kartografického zobrazení se délka opravila o násobnou konstantu z kalibračního listu číslo 10305/98 pořízeného 2.12.1998 ve Zdibech. Jedná se o hodnotu +17,7 / 1,5 km. Veškeré naměřené hodnoty délek a určení součtových konstant s výškovými rozdíly jednotlivých hranolů jsou součástí přílohy č. 2.

Přesnost vodorovné délky naměřené totální stanicí LEICA TC1700 byl převzat od výrobce. Délky byly měřeny čtyřikrát obousměrně a jejich střední chyba délky se vypočte dle vzorce 4.17 v kapitole 4.1.2.

5.2 Měření vodorovných směrů

Vodorovné směry se měřily ve dvou polohách a ve dvou skupinách. Pokud bylo na bodě více než dva měřené směry měřil se i uzávěr. Nejhorší hodnota měřeného uzávěru je 10^{cc}.

Střední chyba měřených úhlů je vypočtena empiricky ze vzorce 5.4 a střední chyba měřeného směru ze vzorce 4.21 z kapitoly 4.2. Hodnota d je rozdíl mezi první a druhou skupinou a n je počet těchto dvojic. [3] Průměrná střední chyba měřeného směru, která byla použita pro výpočet je 4^{cc}. Všechny měřené směry jsou součástí přílohy č. 2.

$$m_{\omega} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum d * d}{n}} \quad (5.4)$$

5.3 Měření zenitových úhlů a výpočet převýšení

Zenitové úhly byly měřeny ve dvou polohách a ve dvou skupinách. Pro maximální eliminaci vlivů prostředí, se vždy měřily zenitové úhly obousměrně v co nejkratších časových rozestupech. Z rozdílů dvojic d mezi skupinami jsem vypočetl přesnost měřeného zenitového úhlu dle vztahu 4.4 se záměnou m_{ω} za m_z . Střední chyba zenitového úhlu mi vyšla 5^{cc}.

Opravené zenitové úhly o indexovou chybu dle vzorce 5.5 jsem dále opravil o rozdíl výšky odrazného hranolu a totální stanice a o vliv refrakce podle vztahu 5.6 a 5.7.

$$z = z_I + \frac{400 - z_I - z_{II}}{2} \quad (5.5)$$

$$\sin \delta_1 = \frac{\Delta * \sin(Z - \varphi)}{s'} \quad (5.6)$$

$$\delta_2 = \frac{2R - \varphi - (z^I + z^{II} + \delta_1^I + \delta_1^{II})}{2} \quad (5.7)$$

Pro výpočet zenitového úhlu opraveného o indexovou chybu se počítá se zenitovými vzdálenostmi v první a druhé poloze. Pro výpočet korekcí δ_1 a δ_2 se

využívá již opravených zenitových vzdáleností o indexovou chybu měřených ze dvou bodů protisměrně. Δ je hodnota zjištěná z měření v laboratoři viz kapitola 5.1 a hodnota φ je středový úhel vypočítán podle vzorce 5.1. Zenitový úhel, který se použil pro výpočet převýšení a pro převod šikmé délky na vodorovnou se získá přičtením korekcí δ_1 a δ_2 k zenitovému úhlu opraveného o indexovou chybu.

Převýšení mezi body se vypočte ze vztahu 5.8. Výpočet z obou bodů by měl vyjít totožný s opačným znaménkem. Hodnota v_s je výška stroje a v_c je výška hranolu měřeny svinovacím metrem a přepočteny z šikmé výšky na vodorovnou pomocí Pythagorovy věty. Oprava dosahovala hodnot mezi 2,5 mm a 4 mm.

$$h = \frac{s' \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2} - z\right)}{\cos\frac{\varphi}{2}} + v_s - v_c \quad (5.8)$$

Střední chyba měřeného převýšení je vypočtena ze vztahu 5.9 pro vzdálenosti do 100 m a nad 100 m je použit vzorec 5.10. [8]

$$m_h^2 = m_s'^2 \cdot \cos^2 z + s'^2 \cdot \sin^2 z \cdot m_z^2 + m_{vs}^2 + m_{vc}^2 \quad (5.9)$$

$$m_h^2 = m_s'^2 \cdot \cos^2 z + s'^2 \cdot \sin^2 z \cdot m_z^2 + m_{vs}^2 + m_{vc}^2 + \frac{s^4}{4 \cdot R^2} \cdot m_k^2 \quad (5.10)$$

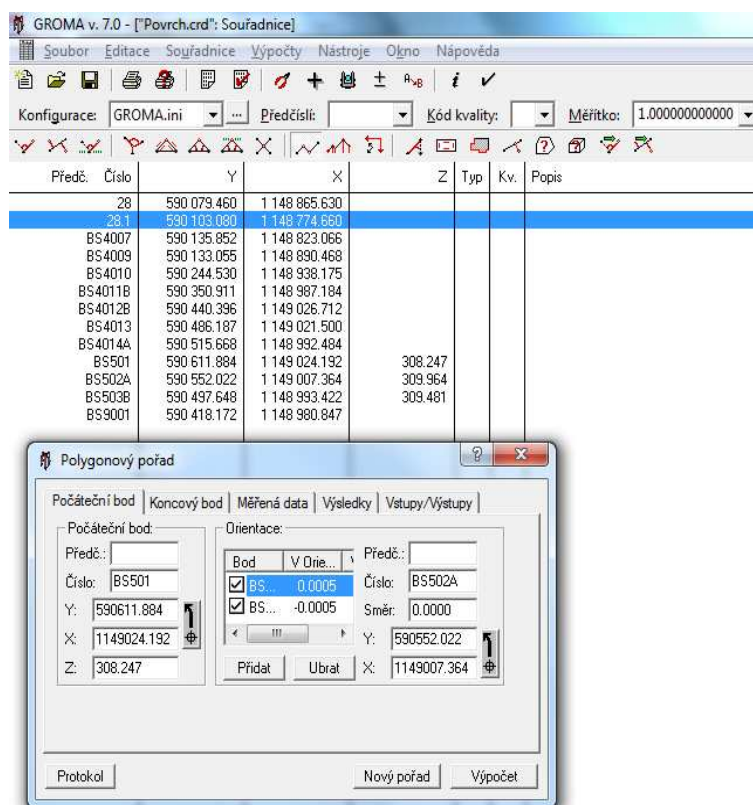
Měřené zenitové úhly a vypočtené převýšení jsou součástí přílohy č. 2.

5.4 Výpočet povrchového polygonového pořadu

Pro výpočet povrchového polygonového pořadu bylo vycházeno z předpokladu, že zadané souřadnice bodů jsou bezchybné. Proto se přibližné souřadnice bodů polygonového pořadu vypočítaly v softwaru Groma 7 pomocí funkce výpočet polygonového pořadu. Parametry povrchového polygonového pořadu jsou patrné z tabulky č. 5.1. Na obrázku 5.3 je vidět prostředí softwaru Groma 7 s připraveným výpočtem polygonového pořadu.

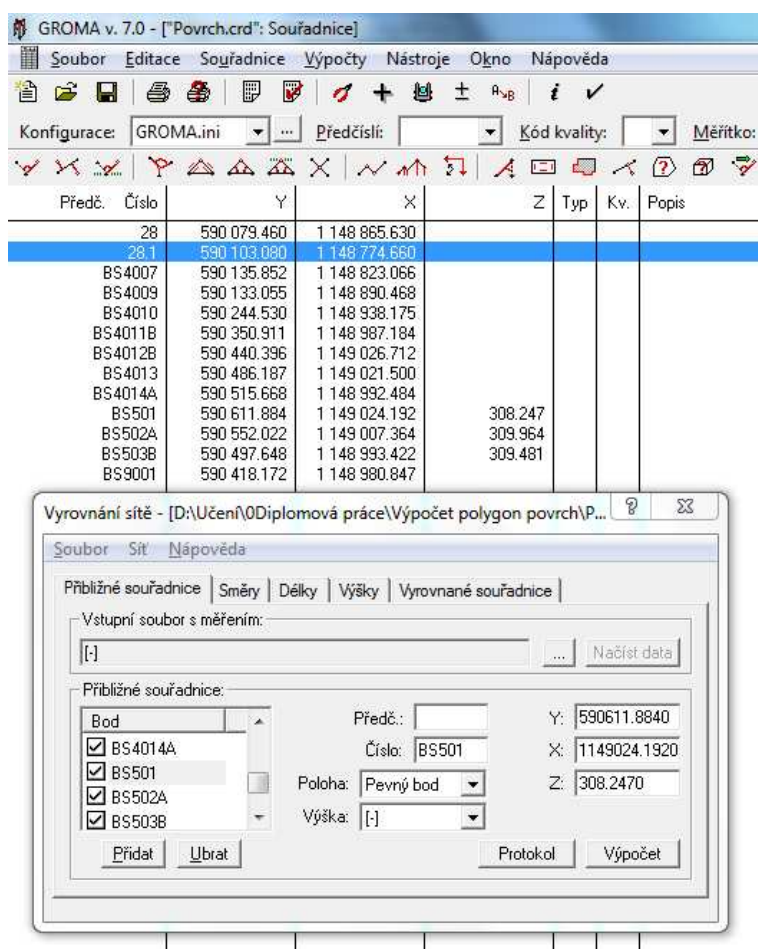
Tabulka č. 5.1 – Parametry povrchového polygonového pořadu

Typ pořadu	Vetknutý, oboustranně orientovaný
Délka přadu	584.039 m
Úhlová odchylka	0.0066 g
Odchylka Y/X	-0.001m / 0.015m
Polohová odchylka	0.016 m
Největší / nejmenší délka v pořadu	121.256 m / 41.364 m
Poměr největší / nejmenší délka	1 : 2.93
Max. poměr sousedních délek	1 : 2.45
Nejmenší vrcholový úhel	130.2421 g



Obrázek č. 5.3 – Výpočet přibližných souřadnic v Gromě 7

Výpočet opravených souřadnic bodů polygonového pořadu se provedl v softwaru Groma 7 pomocí funkce vyrovnání sítě. Zde se použily hodnoty přibližných souřadnic vypočtených viz výše a charakteristiky přesnosti popsané v předchozích podkapitolách. Software Groma 7 jako součást vyrovnání vypočítá i charakteristiky přesnosti a parametry elips chyb. Na obrázku 5.4 je vidět prostředí softwaru Groma 7 s připraveným vyrovnáním sítě. Vyrovnané souřadnice, charakteristiky přesnosti i parametry elips chyb jsou součástí přílohy č. 5. Součástí přílohy č. 5 je i výpočetní protokol.



Obrázek č. 5.4 – Výpočet souřadnic v Gromě 7

Pro výpočet výšek bodů byl zvolen bod BS501 jako výchozí a bezchybný.
Pro výpočet přesnosti výšek bodů byl využit vztah 5.11.

$$m_{Hn}^2 = m_{h1}^2 + m_{h2}^2 + \dots + m_{hn}^2 \quad (5.11)$$

6 Metoda elektromagnetické lokalizace

V rámci mé práce testuji přesnost zařízení, které je ve speleologických kruzích nazýváno radiomaják. Tento přístroj funguje na principu elektromagnetické indukce a je používán pro elektromagnetickou lokalizaci. Radiomaják využívá nízké frekvence, a proto se může člověk setkat i s označením zařízení jako nízkofrekvenční indukční zařízení. Toto zařízení využívá znalosti elektromagnetického pole pro využití provažování bodů skrz masiv horniny. Tato hornina nesmí být magneticky vodivá, protože to významně ovlivňuje přesnost měření. [6]

Pan Zdeněk Šerebl je blanenským speleologem a v rámci svého volného času se zabývá i pokusy se svým zařízením radiomajákem. Vysílací anténa je složená ze šesti dřevěných lišt o délce asi 3 m se společným jedním koncem ve středu tvoří druhé konce lišt vrcholy šestiúhelníku, který je dále spojen plastovou páskou. Při práci mého předchůdce Ing. Martina Šklíby byla využita druhá anténa o průměru asi 1,5 m a vývod z obou cívek byl připojen na generátor o frekvenci 2,86 kHz. Zařízení použité v roce 2006 bylo zničeno, a proto u mnou testovaného radiomajáku se jedná o druhou generaci zařízení, která funguje na stejném principu. Vysílací anténa je vyobrazena na obrázku č. 6.2. [5, 6]

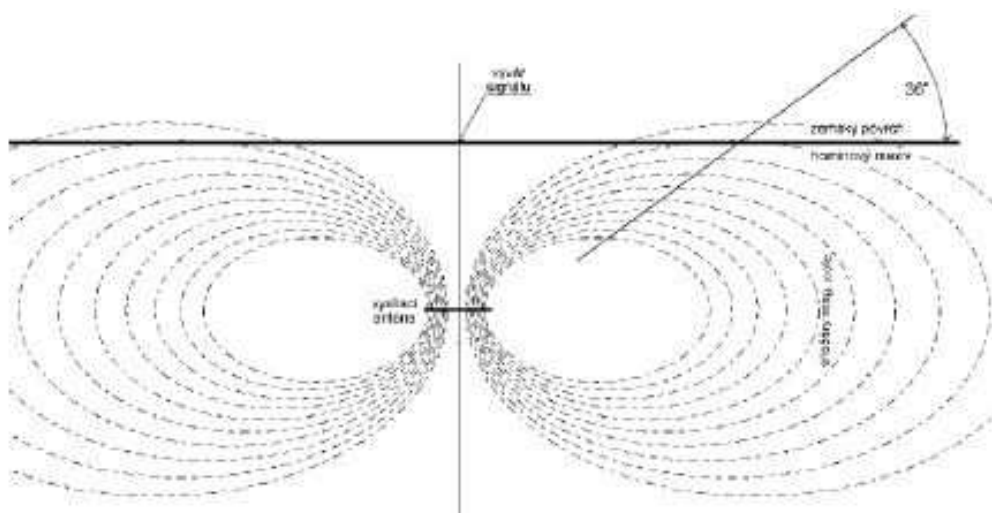
Přijímač je cívka v ocelové kostře čtvercového tvaru se zaoblenými rohy o délce strany 50 cm. Vývod signálu je veden do sluchátek přes rezonanční obvod. Zařízení druhé generace má zesílené napětí na koncovce zesilovače před sluchátky a zároveň na něm jsou využity pásmové propustě. Pokud je osa cívky rovnoběžná se směrem siločar, vzniká tím maximální příjem signálu. Minimální příjem signálu získáme natočením cívky kolmo na směr silo čar. V přibližném místě vývěru signálu měřič naklání přijímač v pozici minima ve dvou směrech na sobě kolmých a s malým náklonem přijímače vůči zemi. Při náklonu ve všech čtyřech směrech musí být signál stejně silný, aby se měřič nacházel v místě vývěru signálu. Ukázka přijímače v rukou pana Šerebla je na obrázku č. 6.3. [6]

Radiomaják má řadu využití. V této práci byla testována přesnost vertikálního provažování bodu v jeskyni na povrch pomocí geodetického zaměření. Mezi další využití přístroje patří určování místa prorážky pro štoly, mapování podzemních prostor, při záchrane života zasypaných horníků a to nejen vertikálním

směrem ale jakýmkoliv směrem. Zkrátka pro místa se zvýšenou obtížností přístupu a s menší náročností na přesnost. První výzkumy se zařízením tohoto typu začaly v Africe či Spojených státech ve čtyřicátých letech 20. století. Jednalo se o zařízení s nízkými kmitočty. [6]

Měřicí aparatura je složená ze dvou částí. První část je anténa umístěná v podzemí a druhá část je přijímač v ruce měřiče. Anténa je složená jako rezonanční LC obvod s velkoplošnou cívkou a s generátorem, který je napájen baterií. Na měření má největší vliv průměr cívky vysílací antény. Ten ovlivňuje intenzitu signálu a tvar elektromagnetického pole. Pro menší vliv prostředí a pro větší dosah měření se používá generovaný kmitočet co nejnižší. Čím je kmitočet nižší, tím je zapotřebí většího zařízení. [6]

Měření je velmi ovlivněno působením vysokého napětí v okolí měření. Proto je nutné se vysokému napětí vyhnout a pro zamezení rušení signálu se volí frekvence co možná nejdále od násobků síťové frekvence 50 Hz. Vysílací anténa vytváří magnetické pole ve tvaru, který je naznačen na obrázku č. 6.1. Přijímač zachycuje signál antény a pomocí koncového zesilovače je přiváděn do sluchátek měřiče.



Obrázek č. 6.1 – Ukázka magnetického pole vytvořeného anténou radiomajáku [6]

Samotné měření probíhá tak, že se vysílací anténa umístí v podzemí do vodorovné polohy pomocí stavební laserové vodováhy na bod, který chceme provažovat. Poté se zapne vysílání antény. Na povrchu měřič pomocí zvuků ve sluchátkách určí přibližnou polohu pomocí maxima signálu a poté přesnou polohu

vývěru signálu pomocí metody minima. [6]

Výrobce zařízení tvrdí, že do hloubky 100 m je schopen určit i převýšení provažovaných bodů řádově na metry. Určení převýšení se provede tak, že se najde místo, kde jsou siločáry vodorovné, což je patrné z obrázku č. 6.1. Místo kde jsou siločáry vodorovné najdeme tak, že se odstoupí od místa minima, kde minimum signálu bude přicházet do antény pod úhlem 90° . Při znalosti úhlu sklonu, což je 36° naznačeno na obrázku 6.1 a vzdálenosti vývěru signálu od místa, kde jsou siločáry vodorovné, jsme schopni spočítat hodnotu převýšení. [6]

Při měření pomocí radiomajáku je nutno provést minimálně 2 měření. Přesnost radiomajáku je závislá na hloubce uložení vysílací antény a na množství materiálů se schopnostmi ovlivnit magnetické pole v okolí měření. S rostoucí hloubkou uložení antény je nutno dávat větší důraz na vodorovné umístění antény, jinak bude nakloněná anténa vysílat siločáry jiným než vertikálním směrem. Polohová přesnost udána panem Šereblem má být 1 procento z převýšení mezi body a úkolem této práce je tuto přesnost otestovat. [6]



Obrázek č. 6.2 – Ukázka vysílací antény radiomajáku



Obrázek č. 6.3 – Ukázka přijímacího zařízení radiomajáku

6.1 Zaměření

Měření proběhlo ve dvou dnech a byly celkem zaměřeny 4 body. 23.7.2012 proběhlo měření dvou bodů MB1 a MB2 pomocí totální stanice TOPCON GPT – 3003N s výrobním číslem 4D0508. Body zaměřené v jeskyni mají index J a body zaměřené na povrchu mají index P. Body byly na povrchu i v jeskyni zaměřeny rajónem, kdy se směry měřily ve dvou polohách a šikmá délka byla měřena dvakrát. Měření ve dvou polohách mělo hlavně eliminovat hrubou chybu při zápisu hodnot do zápisníku. U vysílací antény se zaměřoval vždy střed antény. Bod MB1 se umístil v Předšní jeskyně Býčí skála. Bod MB2 byl zvolen v chodbě poblíž Jižní odbočky mezi body BS506 a BS507. Určení vývěru signálu na povrchu bylo provedeno vždy třikrát.

Druhé měření proběhlo 2.5.2013 a byly zaměřeny další dva body MB3 a MB4. Měření proběhlo kvůli neuspokojivých výsledků bodu MB2, kdy polohová odchylka mezi bodem v jeskyni a bodem na povrchu dosáhla 29 m. Byla použita totální

stanice stejného typu s jiným výrobním číslem 4D0512. Bod MB3 byl umístěn v Předsíni nedaleko bodu MB1 a bod MB4 byl umístěn v chodbě mezi body BS510 a BS511. Určení vývěru signálu na povrchu bylo provedeno vždy dvakrát.

Naměřené zenitové úhly byly opraveny o indexovou chybu a poté se šikmé délky přepočítaly na vodorovné. Z těchto hodnot byly spočítány souřadnice bodů v jeskyni a bodů na povrchu pomocí vzorců 6.1 a 6.2. Převýšení a jeho přesnost se počítalo stejně jako v kapitole 5. [4]

$$Y = Y_{BS} + s * \sin(\sigma_0 + \omega) \quad (6.1)$$

$$X = X_{BS} + s * \cos(\sigma_0 + \omega) \quad (6.2)$$

Pro posouzení přesnosti geodetického zaměření byly vypočítány souřadnicové chyby jednotlivých souřadnic a kovariance podle vztahů 6.3, 6.4 a 6.5. Střední souřadnicová chyba se vypočte podle vztahu 3.39 v kapitole 3. Parametry elips chyb jsem vypočetl podle vztahů v kapitole 4 4.42, 4.43 a 4.44. Souřadnicové chyby výchozích souřadnic byly převzány z výpočtů jeskynního a povrchového polygonového pořadu. [4]

$$m_Y^2 = m_{YBS}^2 + s^2 * \cos^2 \sigma * (m_{\sigma_0}^2 + m_{\omega}^2) + \sin^2 \sigma * m_s^2 \quad (6.3)$$

$$m_X^2 = m_{XBS}^2 + s^2 * \sin^2 \sigma * (m_{\sigma_0}^2 + m_{\omega}^2) + \cos^2 \sigma * m_s^2 \quad (6.4)$$

$$m_{XY} = -s^2 * \sin \sigma * \cos \sigma * (m_{\sigma_0}^2 + m_{\omega}^2) + \sin \sigma * \cos \sigma * m_s^2 \quad (6.5)$$

Hodnota σ_0 je směrník na orientační stranu a jeho přesnost je závislá na přesnosti výchozích souřadnic. Přesnost výchozího směrníku jsem vypočetl podle vztahu 6.6.

$$m_{\sigma_0} = \frac{\sqrt{2}}{s} * m_{X,Y} \quad (6.6)$$

Přesnost měřených délek a úhlů se spočetlo pomocí vzorce 5.4 v kapitole 5 pro určení přesnosti úhlů na základě rozdílu dvojic měření. V tomto případě se na místo rozdílů mezi skupinami použilo rozdílů dvojic mezi polohami. Tento postup by se teoreticky dělat neměl, ale vzhledem k tomu, že cílem pro měření byl hranol na tyči a člověk není schopen udržet hranol ve stejné pozici a tím dochází na krátkých vzdálenostech k rozdílům první a druhé polohy v řádu i několika grádových minut. Z tohoto důvodu vliv chyb přístroje v řádu několika grádových vteřin nehraje takovou roli a je možné přesnost měřených směrů a zenitových úhlů takto spočítat.

Veškeré naměřené hodnoty a spočítané souřadnice posuzovaných bodů s charakteristikami přesností jsou součástí přílohy č. 5. Pro určení přesnosti určení provázení pomocí radiomajáku jsem použil vztah 6.7. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce č. 6.1.

$$m_{X,Y}^2 = m_{X,Y,SKYNE}^2 + m_{X,Y,POVRCH}^2 \quad (6.7)$$

Tabulka č. 6.1 – Přesnost geodetického určení

BOD	$m_{x,y}$ [m]	BOD	$m_{x,y}$ [m]
MB1 _J	0,010	MB3 _J	0,009
MB1 _P		MB3 _P	
MB2 _J	0,013	MB4 _J	0,013
MB2 _P		MB4 _P	

6.2 Posouzení přesnosti radiomajáku

V kapitole 6.1 je popsáno určení a přesnost geodetického zaměření provažovaných bodů. Nyní na základě spočítaných souřadnic ze vztahu z kapitoly 6.1 se posoudí vnitřní a vnější přesnost samotného přístroje radiomajáku.

Pro posouzení vnitřní neboli relativní přesnosti se porovnaly souřadnice určovaných bodů na povrchu z opakovaného určení vývěru signálu přijímací anténou. Spočítaly se opravy v_x a v_y , což jsou rozdíly vypočtených souřadnic od aritmetického průměru. A přesnost jednotlivých souřadnic m_x a m_y se vypočetly podle vzorců 6.8 a 6.9.

$$m_x = \sqrt{\frac{\sum v_x^2}{n(n-1)}} \quad m_y = \sqrt{\frac{\sum v_y^2}{n(n-1)}} \quad (6.8)(6.9)$$

Polohová vnitřní přesnost se vypočetla ze vztahu 6.10.

$$m_p = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \quad (6.10)$$

Pan Šerebl tvrdí, že polohová přesnost jeho zařízení je 1 procento z provažovaného převýšení. Vnitřní přesnost je lepší, než udává výrobce viz tabulka č 6.1.

Tabulka č. 6.2 – Vnitřní přesnost radiomajáku

BOD	m_y [m]	m_x [m]	m_p [m]	$m_{p \text{ VÝROBCE}}$
MB1	0,061	0,206	0,215	0,671
MB2	0,417	0,545	0,686	0,843
MB3	0,106	0,053	0,119	0,666
MB4	0,093	0,360	0,372	0,987
CELKEM	0,222	0,344	0,409	

Pro posouzení vnější neboli absolutní přesnosti se porovnaly souřadnice naměřených bodů na povrchu se souřadnicemi bodů naměřených v podzemí. Odchytky se spočítaly jako aritmetický průměr rozdílů v jednotlivých souřadnicích bodů v jeskyni a na povrchu.

Tabulka č. 6.3 – Vnější přesnost radiomajáku

BOD	ΔY [m]	ΔX [m]	ΔP [m]	$m_{p \text{ VÝROBCE}}$	δ_p
MB1	1,095	-2,072	2,353	0,671	1,343
MB2	-8,093	27,357	28,540	0,843	1,686
MB3	-4,196	-5,702	7,080	0,666	1,331
MB4	6,881	-8,801	11,176	0,987	1,974
CELKEM	4,696	6,172	7,758		

Oproti vnitřní přesnosti, vnější přesnost překračuje mezní polohovou chybu danou výrobcem několikanásobně. Absolutní přesnost bodu MB2 vycházela tak špatně, že byla vyřazena z celkového hodnocení přesnosti měření. Velká nepřesnost bodu MB2 byla nejspíš způsobena velkým množstvím látek ovlivňující magnetické pole v masivu mezi body MB2_J a MB2_P.

V tabulce č. 6.4 jsou výsledky vnější přesnosti měření dvou bodů, který byly měřeny Ing. Martinem Šklíbou roku 2006. Bod ^IMV byl umístěn v blízkosti bodu MB2 a bod ^{II}MV byl umístěn v blízkosti bodu MB4. Přesnost radiomajáku druhé generace se od přesnosti radiomajáku první generace v zásadě neliší. Polohová přesnost se pohybuje okolo 8 m pro body provažované na 70 – 100 m, což své využití jistě má, ale pouze pro velmi hrubé určení vztahu podzemí vůči povrchu, nikoli však s přesností s níž se běžně pracuje v geodézii.

Tabulka č. 6.4 – Vnější přesnost radiomajáku z roku 2006 [5]

BOD	ΔY [m]	ΔX [m]	ΔP [m]	$m_{p \text{ VÝROBCE}}$	δ_p
^I MV	-7,120	6,640	9,740	0,857	1,714
^{II} MV	2,710	-5,620	6,420	0,971	1,942
CELKEM	5,387	6,151	8,249		

7 Ostatní

V rámci této diplomové práce byly vypracovány i dvě grafické přílohy. Přílohou číslo 6 je Přehledná situace. Jedná se o formát A2 v měřítku 1:2 000. Přehledná situace byla vyhotovena ve formátu .dwg v softwaru AutoCAD 2013. Přehledná situace obsahuje elipsy chyb všech bodů. Parametry elips chyb pro jeskynní volný polygonový pořad se nachází v příloze č. 4. Parametry elips chyb pro povrchový oboustranně připojený a oboustranně orientovaný polygonový pořad jsou součástí přílohy č. 5 a parametry elips chyb pro body určené rajónem při měření radiomajákem jsou součástí přílohy č. 3. Měřítko elips chyb je 1:2.

Druhou grafickou přílohou jsou geodetické údaje bodů měřených povrchovým polygonovým pořadem. Body jsou součástí Účelového bodového pole Býčí skála. Body určené radiomajákem se nestabilizovaly a pro body jeskynního polygonového pořadu nemá význam formulář geodetických údajů vytvářet. Příloha je označena jako příloha č. 7 a byla vyhotovena ve formátu .dgn v softwaru Microstation 95.

8 Závěr

Úkolem této práce bylo otestovat přesnost zařízení pro elektromagnetickou lokalizaci podzemních prostor. Výrobce jednoho takového zařízení pan Zdeněk Šerebl označuje svůj přístroj za radiomaják. Přesnost tohoto přístroje se testovala v lokalitě Býčí skála v Moravském Krasu s využitím Účelového bodového pole Býčí skála.

Pro zpřesnění volného jeskynního polygonového pořadu se provedlo usměrnění pomocí gyroteodolitu firmy MOM Gi-B2. Bodové pole na povrchu se zajistilo zaměřením povrchového oboustranně připojeného a oboustranně orientovaného polygonového pořadu přístrojem LEICA TC1700. S využitím tohoto bodového pole se mohly body zaměřené radiomajákem zaměřit totální stanicí TOPCON GTP – 3003N pomocí rajónu. Střední chyba geodetického určení bodů radiomajákem prováděných je okolo 1 cm v závislosti na určovaném bodě.

Zařízení bylo testováno na čtyřech vhodně zvolených bodech. Vnitřní polohová přesnost zařízení byla uspokojivá, průměr ze čtyř měření vycházel na 0,409 m. Dosažená vnitřní přesnost není úplně nezávislá. Měřič po prvním určení bodu ví, kde se jeho první určení nachází, místo si pamatuje a při následujících určeních hledá na přibližně stejném místě.

Vnější polohová přesnost hrubě překročila očekávanou přesnost. Výrobce uvádí, že přesnost provázení bodu je jedno procento z převýšení. Body MB1 a MB3 jsou provažovány skrz 67 m skalního masivu, bod MB2 je provažován skrz 87 m a bod MB4 je provažován skrz 99 m skalního masivu. Měření bodu MB2 jsem vyřadil z určení vnější přesnosti radiomajáku, protože jeho polohová odchylka dosahovala 28,5 m. Ze zbylých tří bodů jsem určil polohovou chybu 7,8 m. To je 10x horší přesnost, než udává výrobce.

Při srovnání polohové přesnosti radiomajáků první generace testovaného Ing. Martinem Šklíbou a radiomajákem druhé generace testovaného autorem práce je 0,4 m. Ze dvou měřených bodů Ing. Martin Šklíba určil polohovou přesnost 8,2 m.

Tento přístroj má za sebou spoustu případů úspěšného provázení bodů s přesností uvedenou panem Zdeňkem Šereblem a z toho vyplývá, že daná lokalita a dané převýšení není vhodné pro testování radiomajáku. Přístroj by měl být do 100 m převýšení polohově přesný na jedno procento měřeného převýšení a tudíž se ve skalním

masivu nachází hornina ovlivňující značně magnetické pole. Využití radiomajáku v geodézii nemá podle názoru autora této diplomové práce významnějšího uplatnění. Zařízení je vhodné pro přibližné určení podzemních prostor, protože jeho největší výhodou je rychlost a nezávislost na okolním bodovém poli.

Závěrem bych doporučil další, rozsáhlejší testování v geologicky vhodněji zvoleném prostředí pro určení korekcí z vlivu prostředí, které má na přesnost zařízení zřejmě zásadní vliv.

9 Seznam použitých zdrojů

1. KOVANIČ, L., MATOUŠ, J., MUČKA, A.: *Důlní měřictví*. Praha, SNTL 1990.
2. VYKUTIL, J. *Vyšší geodézie*. vyd.1. Praha: Kartografie, 1982. 319s. ISBN 80-01-02113-0.
3. BÖHM, J., RADOUCH, V., HAMPACHER, M.: *Teorie chyb a vyrovňovací počet*. Praha, GKP 1990. 416s. ISBN 80-7011-056-2.
4. ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A.: *Inženýrská geodézie, návody ke cvičením I*. vyd. Brno: VUT Brno, 1990.
5. ŠKLÍBA, M.: *Analýza přesnosti elektromagnetické lokalizace pozemních prostor*. [Diplomová práce.] Brno, VUT v Brně, FAST, Ústav geodézie 2006. 52s.
6. HRDÁ, J., NAKLÁDAL, P.: *Kalibrace "šerebla" a ještě trochu drsné teorie*. Speleo 42, str. 30-35. Praha, Česká speleologická společnost 2005.
7. Uživatelský manuál gyroteodolitu MOM Gi-B2. S doplněním o schémata vytvořené Ing. Františkem Soukupem.
8. ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J.: *Inženýrská geodézie I, Základy inženýrské geodézie*. vyd. Brno: VUT Brno, 2006.
9. ŠŮTTI, J.: *Geodézia*. vyd. Alfa Bratislava, 1987. 480s.
10. Lewén, I.: *Use of gyrotheodolite in underground control network*. [Master's of Science Thesis in Geodesy] Stockholm, Sweden, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, 2006. 68s.
11. SRNKA, E.: *Matematická kartografie*. Brno, VAAZ 1986. 302s.
12. KRATOCHVÍL, R.: *Plánování usměrnění volných polygonových pořadů*. [Odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí] Brno, 2003.
13. ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J.: *Inženýrská geodézie II, Analýza přesnosti vytyčení polohy*. vyd. Brno: VUT Brno, 2007.
14. PŘICHYSTA, A., NÁPLAVA, M.: *Záhada Býčí skály aneb jeskyně plná otazníků*. Třebíč : Amaprint, 1995.
15. WANKEL, J.: *Obrazy z Moravského Švýcarska a jeho minulosti*. Brno: Muzejní a vlastivědná společnost, 1984. 244s.
16. <http://gis.zcu.cz/studium/gen1/html/ch07s04.html> (ověřená platnost 10.5.2013)

17. <http://www.lelong.com.my/vintage-sokkia-c40-japan-automatic-level-47705505-2009-11-Std-P.htm> (ověřená platnost 10.5.2013)
18. <http://www.allenprecision.com/> (ověřená platnost 10.5.2013)
19. http://www.nabarlane.com/index.php?route=product/product&product_id=68 (ověřená platnost 10.5.2013)
20. http://gis.zcu.cz/studium/mk2/multimedialni_texty/index_soubory/hlavni_soubory/cechy.html (ověřená platnost 10.5.2013)
21. http://www.cittadella.cz/europarc/index.php?index&site=NPR_byci_skala_cz#top (ověřená platnost 10.5.2013)
22. http://cs.wikipedia.org/wiki/B%C3%BD%C4%8D%C3%AD_sk%C3%A1la (ověřená platnost 10.5.2013)
23. <http://www.byciskala.cz/MaRS/index.php> (ověřená platnost 10.5.2013)

10 Seznam obrázků

Obrázek č. 3.1 – Vchod do Předsíně jeskyně Býčí skála	10
Obrázek č. 3.2 – Skalní stěna nad vchodu do jeskyně Býčí skála	10
Obrázek č. 4.1 – Schéma začátku jeskynního volného polygonového pořadu	11
Obrázek č. 4.2 – Totální stanice TOPCON GPT – 3003N	12
Obrázek č. 4.3 – Totální stanice LEICA TC800	12
Obrázek č. 4.4 – Gyroskop	18
Obrázek č. 4.5 – Princip činnosti gyrokompasu	19
Obrázek č. 4.6 – Vliv rotace Země na gyroskop	20
Obrázek č. 4.7 – Chování gyroskopu	20
Obrázek č. 4.8 – Schéma gyroteodolitu Gi-B2	21
Obrázek č. 4.9 – Metoda 4 kyvů	21
Obrázek č. 4.10 – Výpočet astronomického azimutu	22
Obrázek č. 4.11 – Gyroteodolit firmy MOM Gi-B2	22
Obrázek č. 4.12 – Měření s gyroteodolitem firmy MOM Gi-B2 v jeskyni Býčí skála	23
Obrázek č. 4.13 – Kompletní sada gyroteodolitu Gi-B2 v laboratoři B150	23
Obrázek č. 4.14 – Sférický trojúhelník	24
Obrázek č. 4.15 – Meridiánova konvergence	24
Obrázek č. 4.16 – Polární souřadnice	25
Obrázek č. 4.17 – Nivelační přístroj SOKKIA C40	26
Obrázek č. 5.1 – Schéma polygonového pořadu oboustranně připojeného a oboustranně orientovaného	29
Obrázek č. 5.2 – Měření polygonu totální stanicí LEICA TC1700	29
Obrázek č. 5.3 – Výpočet přibližných souřadnic v Gromě 7	33
Obrázek č. 5.4 – Výpočet souřadnic v Gromě 7	34
Obrázek č. 6.1 – Ukázka magnetického pole vytvořeného anténou radiomajáku ...	36
Obrázek č. 6.2 – Ukázka vysílací antény radiomajáku	37
Obrázek č. 6.3 – Ukázka přijímacího zařízení radiomajáku	38

11 Seznam tabulek

Tabulka č. 2.1 – Poskytnuté souřadnice	8
Tabulka č. 4.1 – Parametry pro pásmo BMI Rostfrei	13
Tabulka č. 4.2 – Přesnost naměřených délek ocelovým pásmem	15
Tabulka č. 5.1 – Parametry povrchového polygonového pořadu	33
Tabulka č. 6.1 – Přesnost geodetického určení	40
Tabulka č. 6.2 – Vnitřní přesnost radiomajáku	41
Tabulka č. 6.3 – Vnější přesnost radiomajáku	41
Tabulka č. 6.4 – Vnější přesnost radiomajáku z roku 2006	41

12 Seznam příloh

Příloha č. 1	Měřená data jeskyně
Příloha č. 2	Měřená data povrch
Příloha č. 3	Měřená data radiomaják
Příloha č. 4	Výpočet jeskynního polygonu
Příloha č. 5	Výpočet povrchového polygonu
Příloha č. 6	Přehledná situace
Příloha č. 7	Geodetické údaje o ÚBPBS